

VTT Technical Research Centre of Finland

Rakebus 2020 -projektin vuosiraportti

Söderena, Petri

Published: 09/03/2020

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Söderena, P. (2020). *Rakebus 2020 -projektin vuosiraportti*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-00252-21



VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:



This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Rakebus 2020 -projektin vuosiraportti

Kirjoittajat: Petri Söderena

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Rakebus 2020 -projektin vuosiraportti		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Helsingin seudun liikenne HSL, Petri Saari	Asiakkaan viite VTT-CRM-166472-19	
Projektin nimi Rakebus 2020 - Kaupunkibussien päästömittaukset	Projektin numero/lyhytnimi Rakebus 2020	
Tiivistelmä <p>Rakebus 2020 -projekti on jatkumoa Helsingin seudun liikenteen (HSL) VTT:ltä tilaamille kaupunkibussien suorituskykyarvioinneille. Projektin tavoitteena oli suorittaa alustadynamometrillä HSL:n tilaaman liikenteen piirissä oleville kaupunkibusseille päästömittauksia autojen päästötason todentamiseksi sekä päivittää HSL-VTT yhteistyössä kehitettyä kaupunkibussien päästötietokantaa. HSL käyttää dataa mm. bussiliikenteen kilpailutukseen. Vastaavanlaisia kaupunkibussien päästötason todentamisprojekteja on suoritettu vuodesta 2002 lähtien.</p> <p>Luotu tietokanta on kattava ja ainutlaatuinen. Vuoden 2019 Rakebus projektin jälkeen kaupunkibussien päästötietokanta kattaa kokonaisuudessaan 204 Euro I-VI luokan bussin mittaustuloksen Braunschweig-syklillä ja 56 bussin mittaustuloksen WHVC-syklillä.</p> <p>Vuonna 2017 otettiin päästötietokannassa käyttöön bussien tulosten jaottelu mittauksissa olleiden bussien ajokilometrien perusteella. Jaottelun ansiosta voidaan havaita Euro VI -autojen NO_x-päästöjen olevan alle 150 tkm ajettuina todella matalla tasolla. NO_x-päästöt ja ennen kaikkea niiden hajonta eri autoyksilöiden välillä näyttäisivät kuitenkin tämän hetken tilanteen perusteella kasvavan merkittävästi ajokilometrien kasvaessa.</p> <p>Tämän hetken tietojen mukaan Euro VI -bussien ikääntyminen yli 500 tkm ajetuilla busseilla (seitsemän 2-akselista ja kahdeksan 3-akselista bussia) näkyy siten, että sekä Braunschweig-syklillä (kuuma käynnistys) että WHVC-syklillä (kylmä- ja kuumakäynnistys yhdistelmä) NO_x-päästötaso nousee Euro VI-päästölainsäädännön raja-arvojen (varsinaiset raja-arvot ja ISC) yli. NO_x-päästöt näyttävät selkeästi siis kasvavan ajokilometrien kasvaessa.</p>		
Espoo 9.3.2021 Laatija  Petri Söderena Tiimipäällikkö		Hyväksyjä  Jukka Lehtomäki Manager, Operational Support
VTT:n yhteystiedot VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 111 (vaihde, klo 8.00 - 16.30) Sähköpostiosoitteet: etunimi.sukunimi@vtt.fi		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) HSL, VTT		
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.		

Luettelo käytetyistä lyhenteistä

CNG	Compressed natural gas	Paineistettu maakaasu
CO	Carbon oxide	Hiilimonoksidi
CO ₂	Carbon dioxide	Hiilidioksidi
CVS	Constant volume sampler	Pakokaasukeräin (vakiovirtaus)
DOC	Diesel oxidate catalyst	Diesel hapetuskatalysaattori
DPF	Diesel particulate filter	Diesel hiukkassuodatin
EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle	Euro V ympäristöystävällisempi päivitys
HC	Hydrocarbon	Hiilivety
EAT	Exhaust aftertreatment	Pakokaasujen jälkikäsittely
EGR	Exhaust gas recirculation	Pakokaasujen takaisinkierätyk
NO _x	Nitrogen oxides	Typpioksidit
SCR	Selective catalyst reduction	Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen
SI	Spark ignition	Kipinäsytytteinen (kaasumoottori)
PM	Particulate mass	Partikkelimassa
PN	Particulate number	Partikkelilukumäärä
WHTC	World harmonized transient cycle	Moottorien sertifiointisykli
WHVC	World harmonized vehicle cycle	WHTC:aa vastaava ajoneuvosykli

Sisällysluettelo

Luettelo käytetyistä lyhenteistä	2
Sisällysluettelo	3
1. Toimeksiannon tausta	4
2. Johdanto	5
3. Mittausmenetelmä	8
3.1 Mittausjärjestelmä	8
3.2 Mittaus sykli	9
3.3 Mittausjärjestelyt	11
4. Tulokset	12
5. Tulosten tarkastelu	17
6. Yhteenveto	20

1. Toimeksiannon tausta

Rakebus 2020 -projekti oli HSL:n (Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä) VTT Oy:ltä tilaama kaupunkibussien päästömittauksia koskeva vuoden 2020 kestänyt projekti, joka oli jatkoa ns. Rakebus bussien päästömittaus -projekteille, joita on toteutettu useiden vuosien ajan 2000-luvun alusta lähtien.

Projektin tuloksena HSL saa käyttöönsä VTT:n kaupunkibussien päästötietokannan, jota ylläpidetään jatkuvasti, ja jota on nyt päättäneen projektin tuloksena päivitetty vuosineljänneksittäin vuonna 2020 mitattujen bussien osalta. HSL hyödyntää syntyvää dataa mm. bussiliikenteen kilpailutuksessa ja strategiatyössä.

Asiakas on päättänyt, että bussien päästötietokanta on julkinen.

2. Johdanto

VTT Oy:n ylläpitämää kaupunkibussien päästötietokantaa on koottu vuodesta 2002 lähtien, ja se kattaa tällä hetkellä yhteensä 204 kaupunkibussia (dieselbusseja Euro I - VI-luokissa, kaa-subusseja Euro II - VI-luokissa sekä EEV-luokan etanolibusseja) Braunschweig-syklillä mitattuna. Vuoden 2020 aikana tietokantaan lisättiin 21 kaupunkibussin mittaustulokset joista 17 Rakebus 2020 -projektin mittausten puitteissa ja neljän bussin tulokset Euro VI-kaupunkibussien kenttäseurantaprojektin kautta. Tietokanta sisältää Euro-luokkakohtaiset sekä automerkkikohtaiset keskiarvotulokset. Mittaustulokset perustuvat akkreditoituun mittausmenetelmään ja ovat keskenään täysin vertailukelpoisia, mikä tekee tietokannasta laajuudeltaan poikkeuksellisen kattavan ja ainutlaatuisen jopa maailmanlaajuisesti.

Vuonna 2017 mittauksissa otettiin käyttöön lämmenneellä moottorilla ajettavan Braunschweig-syklin rinnalla myös WHVC¹-testisykli, joka ajetaan kylmä- ja kuumakäynnisteisen syklin yhdistelmänä. Lopullinen tulos ilmoitetaan yhdistelmänä kylmän syklin (14%) ja kuumen syklin (86%) tuloksista. Painokertoimet ovat samat kuin varsinaisessa tyyppihyväksymistestissä käytettävät. Kylmäkäynnisteinen testi lisättiin, koska se tuo hyvin esiin uusimpien autojen herkkyyden lämpötilalle. Tällä hetkellä päästötietokanta sisältää myös 56 kaupunkibussin päästötulokset WHVC-syklillä.

Päästötietokanta päivittyy jatkuvasti uusien ajoneuvojen sekä seurannassa olevien ajoneuvojen mittausten myötä. Ajoneuvojen seurannan kautta voidaan arvioida myös kilometrikertymän vaikutusta ajoneuvojen suorituskyvyn ja päästötason pysyvyyteen.

Kaupunkibussien päästö- ja energiankulutustutkimusta on VTT:llä toteutettu useassa projekti-kokonaisuudessa. Projektit kattavat bussien lisäksi myös kuorma-autokalustoonkohdistuvia hankkeita.

Kertyneiden mittausten myötä on muodostunut selvä kuva ajoneuvojen teknisestä kehityksestä päästöjen ja energian käytön osalta. Koska mittausten taustalla olevat hankkeet ovat olleet pääsääntöisesti julkisesti rahoitettuja, tämä tieto on siten myös pääosiltaan julkisesti saatavilla ja käytettävissä projektijulkaisujen muodossa.

Kaupunkibussien päästötutkimus ja menetelmän kehitys aloitettiin VTT:llä laajemmin vuonna 2002 uuden raskaan kaluston tutkimuslaboratorion valmistuttua. Ensimmäiseen vuodet 2002-2004 käsittäneeseen *Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi* (RAKEBUS) -projektiin osallistuivat seuraavat tahot:

- Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta YTV
- Helsingin Kaupungin Liikennelaitos, Suunnitteluyksikkö²
- Liikenne- ja viestintäministeriö
- Gasum Oy
- Vägverket (Ruotsi)
- The International Association for Natural Gas Vehicles (Uusi-Seelanti)
- VTT

RAKEBUS-projektissa yhtenä keskeisenä tavoitteena oli selvittää erityyppisten kaupunkibussien päästöt todellisuutta vastaavassa dynaamisessa ajossa. Tuolloin jo varauduttiin siihen, että pakokaasujen jälkikäsittelytekniikka lisääntyy merkittävästi. Kaupunkibussien, kuten mui-

¹ WHVC = World Harmonized Vehicle Cycle

² Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunnasta YTV:stä ja ja Helsingin kaupungin liikennelaitoksen suunnitteluyksiköstä muodostettiin vuonna 2010 HSL.

denkin raskaiden autojen, moottorit hyväksytään moottorikokeen perusteella irrallisina, ottamatta huomioon ajoneuvon muita ominaisuuksia kuten voimansiirto, joten tyyppihyväksymistestien tulokset eivät ole sellaisenaan sovellettavissa todellisen liikenteen päästöjen arvioimiseen.

RAKEBUS 2002 – 2005

<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/RAKEBUS.pdf>

<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2007/RakeBus2005.pdf>

<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2007/RakeBus2006.pdf>

RASTU³ 2006 – 2008

http://www.motiva.fi/files/2278/RASTU-loppuraportti_2006-2008.pdf

HDENIQ⁴ 2009 – 2011

<http://www.transec.fi/julkaisut/hdeniq-hanke>

http://www.transec.fi/files/341/VTT_Kaupunkibussien_Paastotietokanta_2010.pdf

http://www.transec.fi/files/556/Kaupunkibussien_paastotietokanta_2011_Yhteenveto_VTTn_menetelmista_ja_mittauksista.pdf

Hyötyajoneuvot 2012

Erkkilä, K., Laurikko, J. & Karvonen, V. Kaupunkibussien päästötietokanta 2012 – Yhteenveto VTT:n menetelmistä ja mittauksista. Report VTT-CR-00455-14, 2014. In Finnish.



RAKEBUS 2013

³ Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristöominaisuudet ja uusi tekniikka 2006-2008

⁴ Energiatehokas ja älykäs raskas ajoneuvo

Karvonen, V. 2013. Kaupunkibussien päästötietokanta 2013 – Yhteenveto VTT:n menetelmistä ja mittauksista. VTT-R-05385-14. 13 s.

http://www.transsmart.fi/files/223/Kaupunkibussien_paastotietokanta_2013.pdf

RAKEBUS 2016

Söderena, P. 2017. Rakebus 2016 – Projektin loppuraportti. VTT-CR-00462-17. 20 s.

http://www.transsmart.fi/files/427/Rakebus_2016_projektin_loppuraportti_20170313.pdf

RAKEBUS 2017

Söderena, P. 20178. Rakebus 2017 – Projektin loppuraportti. VTT-CR-07031-17. 16 s.

http://www.transsmart.fi/files/439/Rakebus_2017_Projektin_loppuraportti.pdf

RAKEBUS 2018

[Söderena, P. 2018. Rakebus projektin vuosiraportti 2018. VTT-CR-00107-19. 17 s.](#)

RAKEBUS 2019

[Söderena, P. 2020. Rakebus projektin vuosiraportti 2019. VTT-CR-00104-20. 17 s.](#)

3. Mittausmenetelmä

3.1 Mittausjärjestelmä

VTT:n raskaiden ajoneuvojen tutkimuslaboratoriossa (Kuva 1) on alustadynamometrin, moottoridynamometrin ja täyden virtaaman keräys- ja laimennuslaitteiston (CVS) lisäksi monipuolinen analyysilaitteisto sekä säänneltyjen päästöjen (CO, HC, NO_x, PM ja PN) että sääntelemättömien päästöjen erikoispakokaasumittauksiin, mukaan lukien laitteistot hiukkasten yksityskohtaiseen karakterisointiin (mm. massaemissio, kokoluokittelu, lukumäärälaskenta).

FroudeConsinen valmistaman alustadynamometrin rullan halkaisija on 2,5 metriä, ja sen tehon vastaanottokyky (jatkuva) on 300 kW. Dynamometri on varustettu erittäin nopealla säätöjärjestelmällä ja sähköisellä inertian simuloinnilla mahdollistaen dynaamisen testauksen (transientitestauksen). Inertian simulointi on säädettävissä alueella 2.500 – 60.000 kg, eli laitteistolla kyetään jäljittelemään jopa maksimiin kuormattua ajoneuvoyhdistelmää, jonka kokonaismassa on 60 tonnia.

Säännellyt pakokaasukomponentit mitataan Direktiivin 1999/96/EC vaatimukset täyttävän täyden virtaaman CVS –laitteiston (alun perin Pierburg CVS-120-WT ja sittemmin osittain AVL laitteilla päivitetty) ja analysaattorijärjestelmän (AMA i60) avulla. Päästöistä kerätään osavirtanäyte koko kokeen (tai osasyklin) ajalta näytempussiin henkilöautojen testin tapaan, josta muodostetaan yksittäisen kokeen keskiarvotulos. Lisäksi pakokaasuista määritetään hetkelliset massaemissioid. Saatua hetkellisestä massaemissioista integroitua tulosta voidaan verrata näytempusseista saatuun keskiarvotulokseen.



Kuva 1. Yleisnäkymä ajoneuvolaboratoriosta. Ylhäällä oikealla näkyy CVS-laitteiston laimennustunneli. Laboratorion lämpötila vakioidaan mahdollisimman tarkan toistettavuuden saavuttamiseksi.

3.2 Mittaus sykli

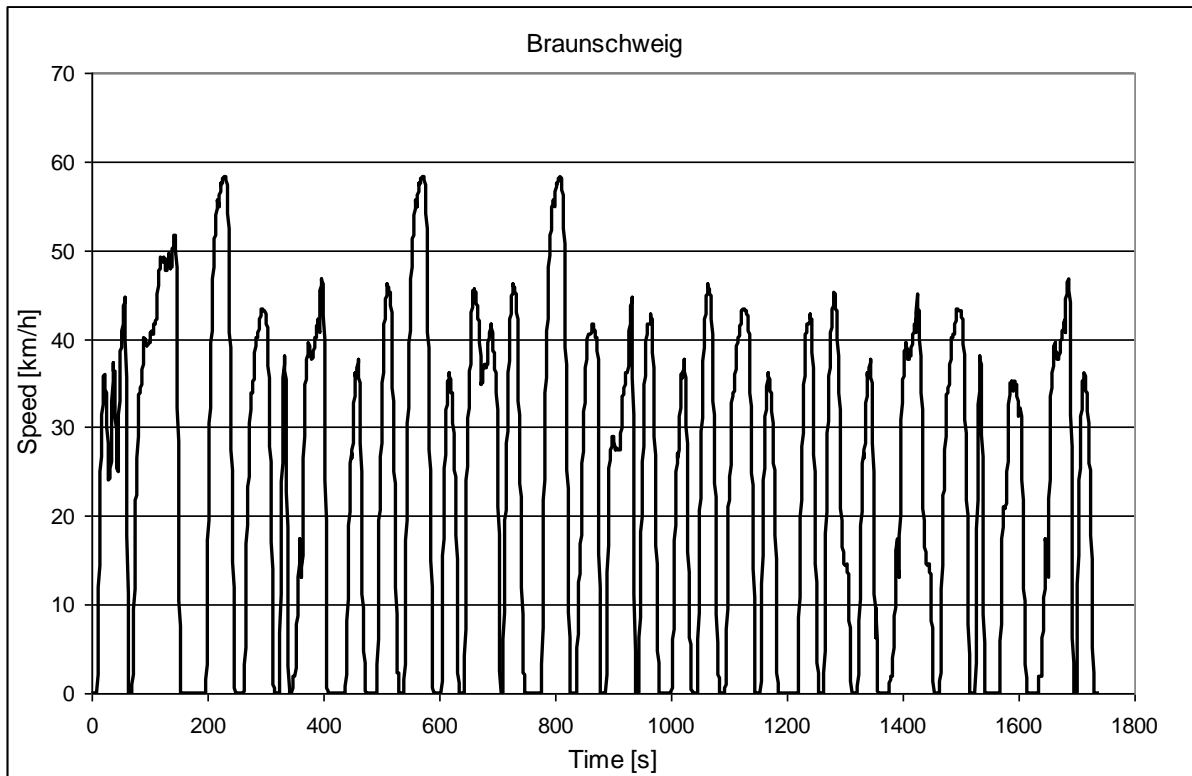
Päästötietokanta koostuu akkreditoidun mittausmenetelmän mukaan alustadynamometrilla ajettujen testien tuloksista⁵. Alustadynamometrilla ajetaan tutkimusmenetelmän mukaisesti Braunschweig -kaupunkibussisykli sekä ja WHVC-kylmä-kuuma yhdistelmäsykli käyttäen inertia-asetuksena ajoneuvon (punnittua) omamassaa lisättynä hyötykuormalla, joka on puolet rekisteriotteen mukaisesta sallitusta enimmäiskuormasta.

Alusta asti mukana olleena mittaus syklinä käytetty Braunschweig-sykli on saksalaisperäinen, Braunschweigin kaupungin bussiliikenteestä aikoinaan kerätty sykli, mutta sittemmin yleisesti tunnettu ja laajalti käytetty varsinkin kaupunkiliikenteen bussien mittaamisessa. Sykli on tallennus ajoneuvon nopeudesta ajan suhteen (Kuva 2), ja se kuvaa vertailumittausten mukaan hyvin myös Helsingin keskustan tyypistä ajoa. Todellisesta ajosuoritteesta tallennettu nopeus/aika-profiili toistetaan kaikilla tutkimuksen ajoneuvoilla. Toisin sanoen kaikilla ajoneuvoilla toteutetaan samanlainen ajosuorite. Tämä on keskeisen tärkeää tulosten vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi, koska erityyppisillä ajosuoritteilla ajoneuvojen suorituskyky ei ole vertailukelpoinen. VTT:n menetelmässä Braunschweig-testisyklillä ajettaessa ajoneuvo sekä dynamometri lämmitetään ennen mittauksia normaaliin käyttölämpötilaan ajamalla puoli tuntia nopeudella 80 km/h. Tämän jälkeen ajoneuvon tila vakioidaan ajamalla yksi kokonainen mittaus sykli, esim. Braunschweig-sykli (1740 s). Vakioinnin jälkeen suoritetaan kaksi peräkkäistä testiajoa, joiden tuloksien keskiarvo on varsinainen ilmoitettava tulos. Mittaus tapahtuu normaalissa huoneenlämmössä (noin +20...+23 °C).

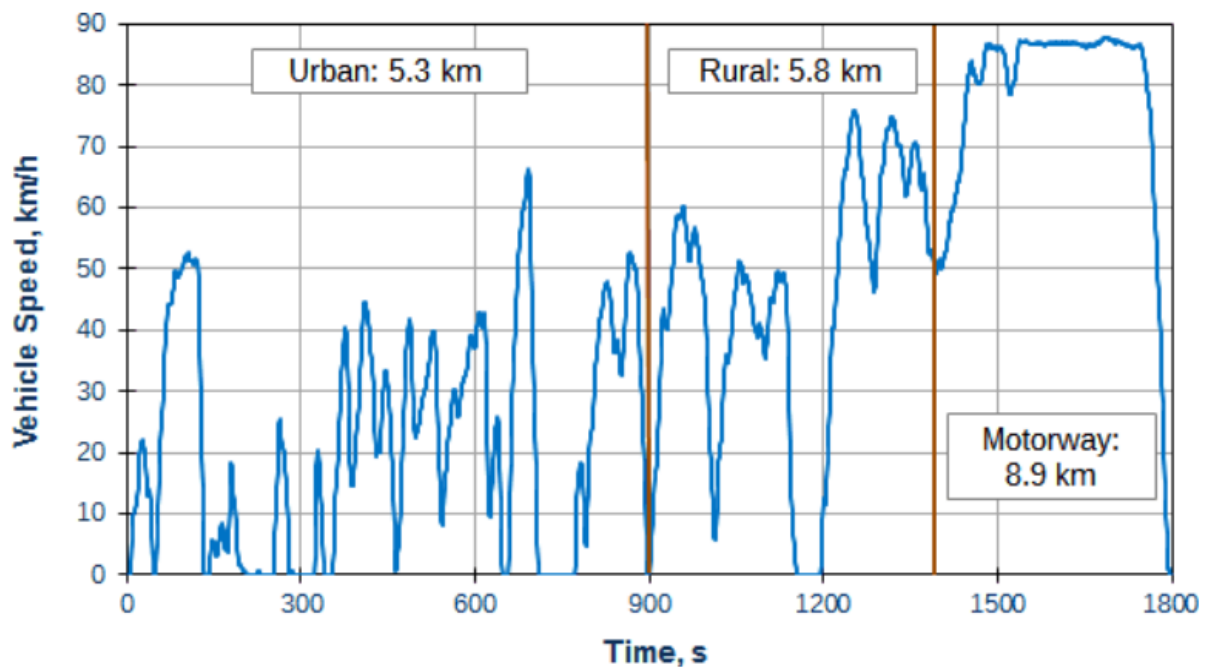
Vuonna 2017 otettiin käyttöön Braunschweig-kaupunkibussisyklin lisäksi WHVC-testisykli, joka ajetaan kylmä- ja kuumasyklin yhdistelmänä. WHVC-testisykli päätettiin ottaa mukaan, jotta dynamometrimittausten tuloksille saadaan parempi vertailtavuus Euro VI-moottoreiden tyyppi hyväksymissykliin (WHTC), josta WHVC on suoraan johdettu muunnos. Moottorin päästöt mitataan WHTC-syklissä sekä kylmäkäynnisteisenä moottori yön yli seisoneena, että lämminkäynnisteisenä. Kylmäkokeen jälkeen pidetään 10±1 minuutin tauko, jonka jälkeen aloitetaan lämmin koe. Moottorin päästöarvot lasketaan näiden kahden tuloksen perusteella, kylmäkokeen painoarvon ollessa 14 % ja lämpimän 86 %. Kaupunkibussien päästötietokantaan suoritettavissa WHVC -kylmä/kuuma -yhdistelmäsykleissä käytetään samaa mittausmenettelyä kokonaiselle ajoneuvolle. WHVC-sykli ei ole nimenomainen kaupunkibussisykli, vaan testisyklillä on tarkoitus jäljitellä ajoneuvon käyttöä kaupunki-, maantie- ja moottoriteliikenteessä. Kuljekin liikennetyypille on oma jakso syklissä. Kuva 3 on esitetty WHVC-testisyklin eri jaksot ja niiden nopeusprofiilit.

WHVC-testauksessa inertia-asetuksena käytetään Braunschweig-testisyklin tapaan hyötykuormaltaan puolikuormaa vastaavaa massaa. Mikäli kesken mittaus syklin havaitaan regenerointitapahtuma, mittaus sykli uusitaan. Molempien testisykliä aikana kertyneet ympäristöpäästöt ja polttoaineenkulutus ilmoitetaan massoina ajomatkaan suhteutettuna [g/km], [kg/km] ja energiankulutus ilmoitetaan myös muodossa [MJ/km].

⁵ FINAS:n VTT:lle myöntämän nykyinen akkreditointitunnus on FINAS T259.



Kuva 2. Braunschweig-kaupunkibussisyklin nopeus – aika profiili.



Kuva 3: WHVC-testisyklin nopeus - aika profiili ja eri liikennetyyppejä vastaavat jaksot.

Euro VI-autojen osalta on muodostettu neljä tulostaulukkoa. Nämä ovat vanhan menetelmän mukaiset tulostaulukot Braunschweig-testin tuloksille ja uudet taulukot WHVC-testin tuloksille. Kummankin syklin osalta esitetään Euro-luokkien keskiarvotulokset ja lisäksi merkkikohtaiset keskiarvotulokset.

3.3 Mittausjärjestelyt

VTT käyttää kaupunkibussien seurantamittauksissa tavallista jakeluasemilta saatavaa kaupapalaatuista, kevät-, kesä- ja syyskäyttöön tarkoitettua (-5/-15) dieselpolttoainetta (Neste dieselpolttoaine, B7/EN590). Polttoaine-erät hankitaan VTT:lle noin kaksi kertaa vuodessa ja niistä otetaan kontrollinäytteet, jotka arkistoidaan.

Ajoneuvon polttoaineen kulutus testin aikana mitataan ulkoisesta polttoainesäiliöstä punnitsemalla. Hiilidioksidipäästöjen määrittämisessä käytetään pakokaasuanalysointilaitteiden tuottaman pitoisuustiedon sijasta punnittuun polttoaineenkulutukseen perustuvaa laskentaa paremman mittatarkkuuden vuoksi.

Polttoainetiedot (tiheys, ominais-CO₂ arvo ja lämpöarvo) perustuvat dieselin ja maakaasun osalta Euroopan Komission yhteisen tutkimuslaitoksen (JRC) raporttiin EUR 26028 EN – 2014 Well-to-Wheels analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context (https://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/report_2014/wtt_report_v4a.pdf).

Etanolidieselin (lisäaineistettu etanoli ED95/RED95) osalta laskentaperusteena on käytetty etanolin hiilipitoisuutta ja polttoaineen lämpöarvoa.

Kaupunkibussien ajovastuksina käytetään vastuksia, jotka on määritetty kullekin ajoneuvoluokalle (12 metriä/2-akselinen, 14 metriä/3-akselinen) rullauskokeilla käyttäen kuormana puolta nimelliskuormasta. Puolikuorma antaa kuvan ajoneuvojen keskimääräisestä suorituskyvystä. Kuorman vaikutus runsaasti kiihdytyksiä ja jarrutuksia sisältävässä Braunschweig-syklissä on merkittävä, sillä ajoneuvon massan kiihdyttämiseen käytetään n. 70 % vetopyörälle tuodusta energiasta. Tyypillisesti siis vetopyörälle tuodusta työstä n. 20 % kuluu vierintävastuksen voittamiseen, n. 10 % ilmanvastuksen voittamiseen ja loput n. 70 % käytetään massan kiihdyttämiseen.

Bussit mitataan siinä kunnossa kun ne ovat VTT:lle liikennöitsijöiltä tullessaan olleet. Mahdolliset virheilmoitukset tai moottorin virheellinen toiminta eivät siis suoraan estä mittauksia. Perusteluna tälle on, että ylläpidettävän tietokannan halutaan kuvaavan mahdollisimman hyvin tilannetta, joka vastaa liikenteessä olevien bussien kuntoa ja siten vallitsevaa todellisuutta. Ennen varsinaisia mittauksia kullakin autolla ajetaan 30 min 80 km/h, jotta autot ovat aina samalla tavalla "valmisteltuja" mittauksia varten. Erityisesti autojen, joissa on SCR-järjestelmä, päästötuloksiin vaikuttaa merkittävästi, miten autoa on käytetty ennen mittausta. SCR-järjestelmällä on ominaista varastoida ureaa SCR-katalyytin pinnalle erityisesti silloin kun katalyyttinen reaktio ei ole vielä käynnistynyt. Menettelyn tavoitteena on lisäksi tuoda esille mahdollinen jälkikäsitteilyjärjestelmän hiukkassuodattimen regenerointitarve. Mikäli auton jälkikäsitteilyjärjestelmä alkaa regeneroida hiukkassuodatinta jatketaan ajoa, kunnes regenerointi on päättynyt. Mikäli regenerointi ei kuitenkaan pääty useasta yrityksestä huolimatta eikä autoon syty vika- tai häiriöilmoituksia todetaan auto sen jälkeen normaalisti toimivaksi.

4. Tulokset

VTT:n kaupunkibussien päästötietokannan tiivistelmät koostuvat neljästä taulukosta. Taulukko 1:ssä on esitetty kootusti kaupunkibussien keskimääräiset päästöt Braunschweig -syklillä ajoneuvon rakenteen ja polttoaineen perusteella jaoteltuna. Jaottelussa ovat mukana myös hybridi- sekä kevytrakenneteknologiaa käyttävät kaupunkibussit. Taulukko 2:ssa on esitetty kaupunkibussien päästöt merkkikohtaisesti polttoaineen ja ajoneuvon tyypin mukaan jaoteltuna.

Vuonna 2017 käyttöön otetun WHVC-syklin tulokset ovat esitetty Taulukko 3 -Taulukko 4:ssä. Taulukko 3:ssa on esitetty Euro VI- ja retrofit Euro VI⁶ -kaupunkibussien keskimääräiset päästöt WHVC-syklillä. Taulukko 4:ssa on esitetty merkkikohtaiset päästöt Euro VI-kaupunkibusseille WHVC-syklillä.

Molempien syklien tulokset ovat keskimääräisiä koostuen useamman eri ajoneuvon päästötuloksien keskiarvosta. Vuonna 2017 myös päästötietokantataulukon esitystapaan tehtiin muutoksia. Tulokset ovat nyt jaoteltu EEV- ja Euro VI-bussien osalta ajokilometrien perusteella kolmeen luokkaan: luokka 1. alle 150 tkm, luokka 2. 151 tkm ... 500 tkm ja luokka 3. yli 501 tkm.

Vuoden 2020 Rakebus projektin aikana pääpaino oli yli 500 tkm ajetuissa Euro VI-kaupunkibusseissa. Käytetyn jaottelun perusteena on se, että bussit ajomäärän mukaan jaottelemalla saadaan esiin mahdollinen pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteiston toiminnan huononemisesta johtuva päästöjen kasvu ajokilometrien karttuessa. NO_x-päästöjen keskihajonnalle on EEV- ja Euro VI-päästötason bussien osalta oma sarake, jotta keskiarvotulokseen mahdollisesti vaikuttavien yksittäisten bussien suurten poikkeamien vaikutus olisi lukijalle näkyvissä. Mikäli NO_x-päästöjen keskihajonta sarakkeesta puuttuu arvo, se tarkoittaa, että mitattuja autoyksiköitä on vain yksi.

Vuoden 2020 Rakebus projektin loppuraporttia varten tehtiin tulosten jaottelun osalta Euro VI-busseille erilliset kuvaajat havainnollistamaan CO₂- ja NO_x-päästöjen kehittymistä ajomäärän suhteen. Tarkastelu tehtiin Braunschweig-syklillä.

⁶ Retrofit Euro VI-kaupunkibussilla tarkoitetaan bussia, johon on jälkikäteen asennettu pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmä, jolla ajoneuvon päästöt täyttävät Euro VI vaatimustason.

Taulukko 1: Euro I - VI diesel, CNG ja etanolikaupunkibussien keskimääräiset päästöt Braun-schweig-syklillä rakenteen mukaan jaoteltuna.

Braunschweig	Number n	Mileage Min	Max	CO g/km	HC g/km	CH ₄ g/km	NOx g/km	NOx g/km std.	PM g/km	CO ₂ g/km	CO ₂ eqv** g/km	FC kg/100k m	FC MJ/km
2 - axle													
Diesel Euro I	2	555025	672700	1.39	0.32		15.59		0.436	1220	1220	38.6	16.6
Diesel Euro II	13	160500	1125674	1.60	0.21		12.86		0.213	1286	1286	40.7	17.5
Diesel Euro III	14	15934	786164	0.85	0.12		8.48		0.209	1213	1213	38.4	16.6
Diesel Euro IV	8	6105	474152	2.96	0.10		8.36		0.112	1207	1207	38.2	16.5
Diesel Euro V***				2.96	0.10		7.51		0.089	1207	1207	38.2	16.5
Diesel EEV	17	0	150000	0.93	0.03		5.88	1.09	0.061	1160	1160	36.7	15.8
Diesel EEV	14	150001	500000	0.90	0.03		6.21	0.76	0.065	1130	1130	35.8	15.4
Diesel EEV	3	500001	727134	3.65	0.10		5.59	0.30	0.147	1204	1204	38.3	16.5
Diesel Euro VI	7	0	150000	0.14	0.00		0.10	0.13	0.017	1117	1117	35.3	15.2
Diesel Euro VI	12	150001	500000	0.09	0.00		0.98	0.51	0.010	1113	1113	35.2	15.2
Diesel Euro VI	7	500001	620999	0.07	0.01		1.20	0.44	0.004	1102	1102	34.9	15.0
Ethanol EEV	4	25249	133297	4.01	0.69		6.25		0.022	1321	1321	69.2	17.5
Diesel Hyb. EEV	5	2602	136255	0.89	0.02		5.12		0.046	848	848	26.9	11.6
Diesel Hyb. Euro VI	1	68310	68310	1.66	0.00		0.21		0.011	943	943	29.8	12.9
CNG Euro II *	2	211000	672946	4.32	7.12	6.76	16.92		0.009	1140	1295	42.1	20.7
CNG Euro III	2	37600	237189	0.05	2.64	2.38	9.44		0.019	1185	1240	43.7	21.5
CNG EEV	6	0	150000	1.25	1.19	0.98	2.91	1.43	0.009	1302	1325	48.0	20.7
CNG EEV	2	150001	500000	2.53	0.44	0.37	2.06	0.34	0.004	1187	1195	43.8	18.9
CNG EEV	3	500001	640252	10.52	2.07	1.85	6.64	0.44	0.005	1263	1306	46.6	20.1
CNG Euro VI	2	347	36047	0.53	0.06	0.04	0.09	0.02	0.025	1068	1068	39.4	19.4
2 - axle combined cold and hot test cycle *****													
Diesel Euro VI*****	3	0	150000	0.16	0.01		1.59	1.10	0.030	1138	1138	36.0	15.5
Diesel Euro VI*****	3	150001	500000	0.26	0.01		0.82	0.37	0.015	1075	1075	34.0	14.7
Diesel Euro VI*****	0	500001	-										
CNG Euro VI*****	2	347	35992	0.61	0.19	0.13	0.42	0.26	0.024	1078	1081	39.8	19.6
2 - axle, lightweight													
Diesel****	4	993	26436	0.88	0.03		6.70		0.047	953	953	30.17	13.0
Diesel Euro VI	3	8977	130511	0.12	0.00		0.18	0.24	0.009	958	958	30.33	13.1
Diesel Euro VI	7	150001	500000	0.02	0.00		0.85	1.01	0.005	993	993	31.44	13.5
3 - axle													
Diesel Euro V	4	1400	232494	6.68	0.03		3.16		0.089	1414	1414	44.8	19.3
Diesel EEV	7	0	150000	1.24	0.04		6.02	3.33	0.072	1462	1462	46.3	19.9
Diesel EEV	0	150001	500000										
Diesel EEV	2	500001	830076	0.80	0.08		6.28	1.61	0.134	1457	1457	46.1	19.9
Diesel EEV Retro E6	4	297530	838336	0.08	0.00		0.77	0.43	0.015	1474	1474	46.6	20.1
Diesel Euro VI	11	0	150000	0.10	0.00		0.42	0.28	0.037	1373	1373	43.4	18.7
Diesel Euro VI	11	150001	500000	0.09	0.00		2.25	0.47	0.010	1414	1414	44.7	19.3
Diesel Euro VI	8	500001	689510	0.05	0.01		1.70	0.69	0.003	1383	1383	43.8	18.9
CNG EEV	1	0	150000	4.91	1.75	1.62	8.77		0.012	1396	1434	51.5	25.4
CNG EEV	2	150001	350000	3.31	0.98	0.86	3.38	2.55	0.005	1411	1431	52.1	25.6
CNG EEV	3	350001	651529	16.19	1.98	1.78	7.22	3.04	0.016	1424	1465	52.5	25.9
CNG Euro VI	1	41390	41390	0.47	0.04	0.02	0.01		0.01	1318	1319	48.6	23.9
3 - axle combined cold and hot test cycle *****													
Diesel Euro VI*****	1	0	150000	0.39	0.00		1.03		0.022	1390	1390	44.0	19.0
Diesel Euro VI*****	3	150001	500000	0.22	0.00		2.25	0.14	0.013	1444	1444	45.7	19.7
Diesel Euro VI*****	0	500001	-										
Total number of tests 204													
*Methane fueled buses CH ₄ = THC * 0.95													
** CO ₂ eqv = CO ₂ + 23 * CH ₄													
*** Euro V results estimated with the results of Euro IV													
**** Include test results from Euro III, Euro IV and EEV													
***** Weighted average from cold (14%) and hot (86%) cvcles test results													

Taulukko 2: Euro I - VI kaupunkibussien merkkikohtainen päästötaulukko Braunschweig-sykliä päästöluokan sekä ajoneuvon tyyppin mukaan jaoteltuna.

Braunschweig															
Maker	Level	Fuel	Type	Exhaust after treat.	CO [g/km]	HC [g/km]	CH ₄ [g/km]	NO _x [g/km]	NO _x [g/km] std.	PM [g/km]	CO ₂ [g/km]	CO ₂ eqv. **	FC [kg/100 km]	FC [MJ/km]	UC [kg/100 km]
Volvo	Euro I	Diesel	2 - axle		0.06	0.12		19.47		0.248	1352	1352	42.8	18.4	
Scania	Euro I	Diesel	2 - axle		2.71	0.52		11.71		0.624	1087	1087	34.4	14.8	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle		1.16	0.14		12.35		0.157	1343	1343	42.5	18.3	
MB	Euro II	Diesel	2 - axle		1.26	0.31		12.43		0.248	1236	1236	39.1	16.9	
Scania	Euro II	Diesel	2 - axle		0.98	0.24		8.77		0.176	1267	1267	40.1	17.3	
Kabus	Euro II	Diesel	2 - axle		4.31	0.15		16.54		0.398	1368	1368	43.3	18.7	
Renault	Euro II	Diesel	2 - axle		2.40	0.26		15.22		0.257	1155	1155	36.5	15.7	
Volvo *	Euro II	CNG	2 - axle		2.87	8.96	8.51	17.58		0.007	1171	1367	43.2	21.3	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle	PDPF	0.07	0.03		12.34		0.075	1267	1267	40.1	17.3	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle	CRT	0.04	0.10		11.75		0.407	1589	1589	50.3	21.7	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle	SCRT	0.12	0.01		1.54		0.010	1314	1314	41.6	17.9	
Volvo	Euro III	Diesel	2 - axle		1.31	0.02		8.81		0.308	1244	1244	39.4	17.0	
Scania	Euro III	Diesel	2 - axle		0.60	0.17		8.30		0.154	1195	1195	37.8	16.3	
Volvo	Euro III	CNG	2 - axle		0.05	2.64	2.38	9.44		0.019	1185	1240	43.7	21.5	
Scania	Euro III	Diesel	2 - axle	PDPF	0.13	0.03		7.37		0.093	1141	1141	36.1	15.6	
Scania	Euro III	Diesel	2 - axle	SCR + DPF	0.06	0.00		2.51		0.007	1194	1194	37.8	16.3	1.40
Volvo	Euro III	Diesel	2 - axle	CRT	1.17	0.10		9.70		0.042	1103	1103	34.9	15.0	
Volvo	Euro IV	Diesel	2 - axle	SCR	6.71	0.02		11.44		0.083	1119	1119	35.4	15.3	0.55
MB	Euro IV	Diesel	2 - axle	SCR	1.41	0.04		2.57		0.058	1130	1130	35.8	15.4	
Scania	Euro IV	Diesel	2 - axle	EGR	1.78	0.14		8.29		0.134	1258	1258	39.8	17.2	
Iveco	EEV	Diesel	2 - axle	SCRT	0.17	0.00		6.87		0.013	1107		35.0	15.1	2.35
Iveco	EEV	Diesel	2 - axle	SCR	5.03	0.04		6.56		0.154	1208	1208	38.2	16.5	
Volvo	EEV	Diesel	2 - axle	SCR	3.18	0.04		6.09		0.072	1120	1120	35.5	15.3	2.20
Scania	EEV	Diesel	2 - axle	EGR	0.41	0.06		6.43		0.107	1228	1228	38.9	16.7	
VDL	EEV	Diesel	2 - axle	SCRT	0.58	0.01		5.66		0.011	1217	1217	38.5	16.6	
Volvo	EEV	Diesel	2 - axle	SCRT	0.04	0.01		6.96		0.031	1107	1107	35.0	15.1	1.75
VDL	EEV	Diesel	lt. 2 - axle	SCR	0.55	0.01		5.47		0.036	919	919	29.1	12.5	
Scania	EEV	Ethanol	2 - axle		4.01	0.69		6.25		0.022	1321	1321	69.2	17.5	
Iveco	EEV	CNG	2 - axle		2.62	1.17	1.11	2.16		0.008	1038	1063	38.3	18.8	
MAN	EEV	CNG	2 - axle		3.86	0.80	0.76	2.69		0.004	1201	1218	44.3	21.8	
MB	EEV	CNG	2 - axle		0.14	2.53	2.40	4.89		0.016	1583	1639	58.4	28.7	
Iveco	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.11	0.00		1.07	0.86	0.004	1061	1061	33.6	14.5	
MB	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.08	0.00		1.34	0.55	0.011	1051	1051	33.3	14.3	
Scania	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.04	0.01		0.71	0.96	0.010	1254	1254	39.7	17.1	
VDL	Euro VI	Diesel	lt. 2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.05	0.00		0.66	0.90	0.006	983	983	31.1	13.4	2.17
VDL	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.24	0.00		0.56		0.023	1090	1090	34.5	14.9	2.99
Volvo	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.11	0.01	0.00	0.42	0.40	0.006	1089	1089	34.5	14.9	2.19
MB	Euro VI****	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.19	0.01		0.72	0.22	0.032	1069	1069	33.8	14.6	
Iveco	Euro VI****	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.25	0.01		0.33		0.006	1057	1057	33.5	14.4	
Scania	Euro VI****	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.11	0.01		2.69	2.49	0.025	1205	1205	38.1	16.4	
Volvo	Euro VI****	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.37	0.01		1.20		0.009	1101	1101	34.8	15.0	2.00
MB	Euro VI	CNG	2 - axle	KAT	0.65	0.10	0.07	0.11		0.029	1025	1027	37.8	18.6	
Scania	Euro VI	CNG	2 - axle	KAT	0.40	0.03	0.00	0.07		0.022	1110	1110	41.0	20.2	
Scania	Euro III	Diesel	3 - axle	SCR + DPF	0.08	0.01		0.47		0.016	1443	1443	45.6	19.7	
Scania	Euro IV	Diesel	3 - axle	EGR	0.98	0.05		9.75		0.162	1501	1501	47.5	20.5	
Volvo	Euro V	Diesel	3 - axle	SCR	6.68	0.03		3.16		0.089	1414	1414	44.8	19.3	2.94
Volvo	EEV	Diesel	3 - axle	SCR	1.24	0.07		4.74	3.23	0.081	1477	1477	46.7	20.1	2.72
Scania	EEV	Diesel	3 - axle	EGR	0.33	0.04		8.86	0.70	0.105	1438	1438	45.5	19.6	
Golden Dragon	EEV	Diesel	3 - axle	SCR	0.35	0.02		2.97		0.042	1407	1407	44.5	19.2	4.10
VDL	EEV	Diesel	3 - axle	SCRT	3.96	0.02		6.19		0.093	1518	1518	48.0	20.7	1.66
Scania	EEV Ret E6	Diesel	3 - axle	EGR+Retro EAT	0.09	0.00		0.86	0.46	0.018	1480	1480	46.9	20.2	1.81
Volvo	EEV Ret E6	Diesel	3 - axle	Retro EAT	0.05	0.03		0.50		0.007	1455	1455	46.0	19.8	3.85
Scania	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.06	0.01		1.63	2.74	0.01	1421	1421	45.0	19.4	
Solaris	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.00	0.01		0.02	0.00	0.022	1302	1302	41.2	17.8	2.33
VDL	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.16	0.00		1.63	1.12	0.062	1441	1441	45.6	19.7	4.34
Volvo	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.10	0.01		1.46	1.09	0.006	1352	1352	42.8	18.4	2.67
Scania	Euro VI****	Diesel	3 - axle		0.24	0.01		2.40	0.70	0.020	1504	1504	47.61	20.5	
VDL	Euro VI****	Diesel	3 - axle		0.39	0.00		1.03		0.022	1390	1390	43.97	19.0	4.58
Volvo	Euro VI****	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.20	0.00		2.11		0.007	1384	1384	43.80	18.9	
MAN	EEV	CNG	3 - axle	EGR	12.90	1.96	1.77	7.75		0.011	1398	1439	51.6	25.4	
Solaris	EEV	CNG	3 - axle	SEGR	3.19	0.63	0.56	0.83		0.004	1445	1458	53.3	26.2	
Scania	Euro VI	CNG	3 - axle	KAT	0.47	0.04	0.02	0.01		0.006	1318	1319	48.6	23.9	

*Methane fueled buses CH₄ = THC * 0.95

** CO₂ eqv = CO₂ + 23 * CH₄

*** Euro V results estimated with the results of Euro IV

**** Include test results from Euro III, Euro IV and EEV

***** Weighted average from cold (14%) and hot (86%) cycles test results

Taulukko 3: Euro VI ja Euro VI retrofit diesel kaupunkibussien keskimääräiset päästöt WHVC-syklillä rakenteen mukaan jaoteltuna.

[illegible]

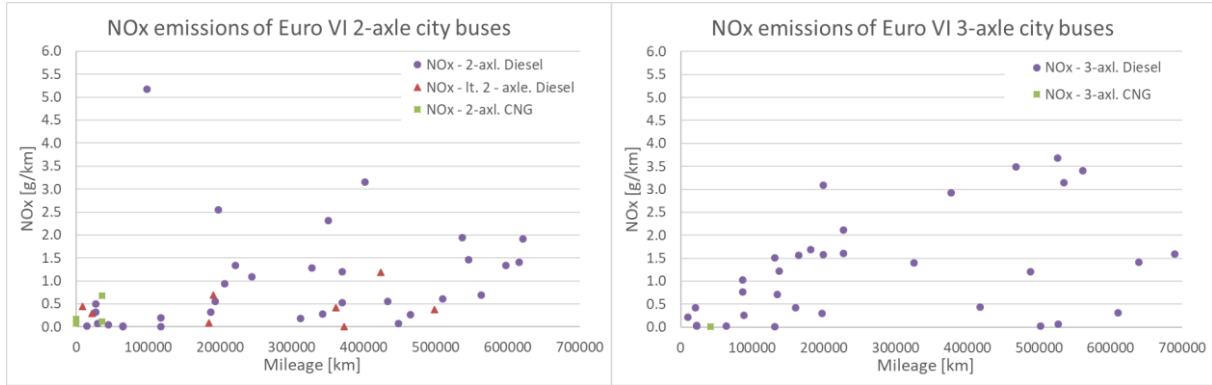
Taulukko 4: Euro VI ja Euro VI retrofit diesel kaupunkibussien merkkikohtainen päästötaulukko WHVC-syklillä päästöluokan sekä ajoneuvon tyytin mukaan jaoteltuna.

WHVC																
Maker	Number n	Level	Fuel	Type	Exht. Aftertreatment	CO [g/km]	HC [g/km]	CH4 [g/km]	NOx [g/km]	NOx [g/km] std.	PM [g/km]	CO2 [g/km]	CO2 eqv. **	FC [kg/100 km]	FC [MJ/km]	UC [kg/100 km]
2 - Combined cold and warm start *																
Iveco	4	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.25	0.00		0.57	0.09	0.007	728	728	23.0	9.9	
MB	6	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.05	0.01		0.77	0.28	0.005	713	713	22.5	9.7	
Scania	5	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.01	0.00		0.85	0.80	0.006	788	788	24.9	10.7	
VDL	1	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.17	0.00		0.44		0.025	756	756	23.9	10.3	2.80
VDL***	9	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.07	0.01		0.61	0.67	0.011	675	675	21.4	9.2	1.83
Volvo	4	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.17	0.00		0.50	0.20	0.003	706	706	22.3	9.6	1.30
MB	1	Euro VI	CNG	2 - axle	TWC	0.73	0.22	0.17	0.33		0.011	703	707	25.9	12.8	
Scania	1	Euro VI	CNG	2 - axle	TWC	0.60	0.06	0.04	0.09		0.015	722	723	26.6	13.1	
3 - Combined cold and warm start *																
Scania retro E6	3	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.01	0.01		1.30	0.01	0.008	917	917	29.0	12.5	0.84
Scania	9	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.05	0.01		0.84	1.15	0.006	913	913	28.9	12.5	
Solaris	1	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.04	0.01		0.11		0.013	841	841	26.6	11.5	1.78
VDL	2	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.10	0.00		1.82	0.49	0.022	909	909	28.8	12.4	3.36
Volvo retro E6	1	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.04	0.00		0.83		0.004	972	972	30.8	13.3	2.44
Volvo	8	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.30	0.01		1.12	0.62	0.004	841	841	26.6	11.6	1.16
Scania	1	Euro VI	CNG	3 - axle	TWC	0.47	0.22	0.17	0.15		0.002	821	824	30.3	14.9	

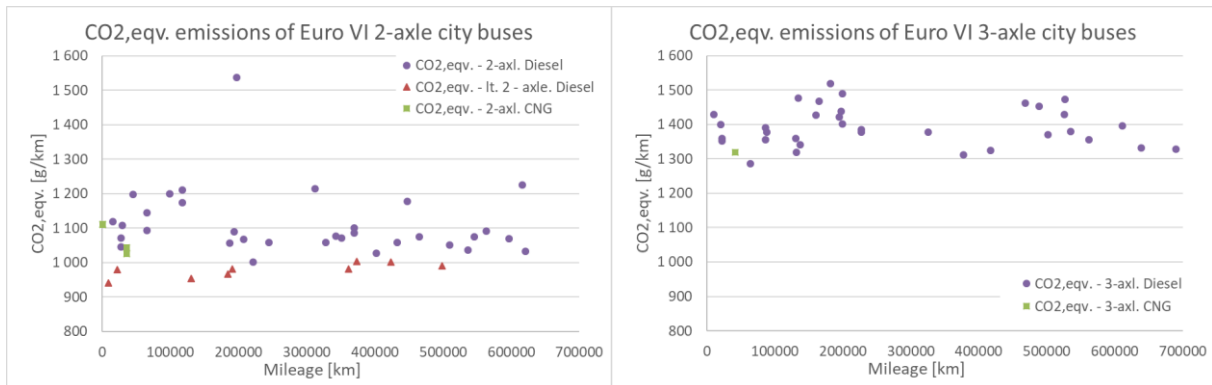
* Weighted average cold (14 %) and warm (86 %) start results

** CO2 eqv = CO2 + 23 * °CH4

*** Lightweight



Kuva 4: NO_x-päästöjen kehittyminen ajokilometrien mukaan Euro VI diesel- ja CNG-busseilla Braunschweig syklillä.



Kuva 5: CO₂-päästöjen kehittyminen ajokilometrien mukaan Euro VI diesel- ja CNG-busseilla Braunschweig syklillä.

5. Tulosten tarkastelu

Taulukko 1:stä (Braunschweig) ja Taulukko 3:ssa (WHVC) Euro VI-päästöluokan dieselbussien tuloksista voidaan huomata, että päästötaso on Euro V-luokan busseilla alle 150 tkm ajetuilla autoilla yleisesti ottaen todella matalalla tasolla. Ero aikaisempiin päästöluokkiin on merkittävä. Euro VI-päästöluokan myötä ajoneuvoissa DPF+SCR-yhdistelmä on käytännössä tullut pakolliseksi pakokaasujen jälkikäsittelymenetelmäksi, jotta lainsäädännön päästövaatimukset täyttyvät, sillä muulla tekniikalla niin vähäisiin päästöihin ei enää päästä.

Myös Euro VI CNG-bussien osalta CO-, NO_x- ja HC-päästöt ovat laskeneet merkittävästi Euro V/EEV -luokkien busseihin verrattuna. Maakaasulla toimivissa Euro VI-kaupunkibusseissa käytetään kolmitiekatalysaattoria, joka vähentää yllä mainitut päästökomponentit hyvin tehokkaasti. CNG-bussien hiukkasmassapäästöissä (PM) ei sen sijaan ole tapahtunut merkittävää muutosta Euro II - VI-luokkien välillä. Tämä selittyy yksinkertaisesti sillä, että homogeenisen seoksen (sekä stoikiometrisen että laihaseos) kipinäsytytys palamismenetelmänä tuottaa maakaasua poltettaessa hyvin vähän hiukkasia.

Vuonna 2017 otettiin käyttöön mittaustulosten jaottelu ajokilometrien mukaan. Tulosten perusteella nähdään, että Euro VI-autoilla NO_x-päästöt ovat uusina (alle 150 tkm ajettuina) todella matalalla tasolla. Tulokset sekä Braunschweig- että WHVC- syklin osalta ovat luokkaa 0,1 g/km 2-akselisten ja 0,4 g/km 3-akselisten autojen osalta.

Mittaukset osoittavat kuitenkin, että NO_x-päästöt nousevat selkeästi ajokilometrien karttuessa. 151 tkm...500 tkm ajetuilla busseilla NO_x-päästöt ovat 2-akselisten bussien osalta nousseet Braunschweig-syklillä jo arvoon 1 g/km ja WHVC-syklillä arvoon 0,6 g/km. Vastaavasti 3-akselisten 151 tkm...500 tkm ajettujen bussien osalta NO_x-päästöt ovat nousseet Braunschweig-syklillä arvoon 2,3 g/km ja WHVC-syklillä arvoon 1,4 g/km.

Yli 500 tkm ajettujen bussien osalta NO_x-päästöt ovat 2-akselisten bussien osalta noin 1,2 g/km Braunschweig-syklillä ja noin 0,7 g/km WHVC:n osalta. 3-akselisten bussien osalta NO_x-päästöt ovat noin 1,7 g/km Braunschweig- ja noin 0,7 g/km WHVC-syklillä.

Kaiken kaikkiaan ajokilometreillä näyttäisi olevan siis yhteys NO_x-päästöjen kasvuun. Kuva 4:ssä näkyy miten yksittäisten bussien mittaustulokset jakautuvat ajokilometrien mukaan. Kuva vasta voidaan nähdä, että merkittävin järjestelmän tehokkuuden lasku tapahtuu noin 100 tkm jälkeen. Tämän jälkeen hajonta NO_x-päästöissä yksittäisten bussien osalta kasvaa merkittävästi. Erityisesti 3-akselisilla busseilla erot vähä- ja suuripäästöisimpien yksilöiden välillä ovat todella merkittäviä. Pienimmillään päästöt ovat samaa tasoa kuin uusilla busseilla, mutta suurimmillaan yli 3 g/km joka on sama tasoa kuin 3-akselisilla Euro V-dieselbusseilla keskimäärin. Kuva 4 osoittaa, siis sen että Euro VI-dieselbussien NO_x-päästöjen hallintajärjestelmien (SCR) toiminnassa on huomattavia yksilöllisiä eroa.

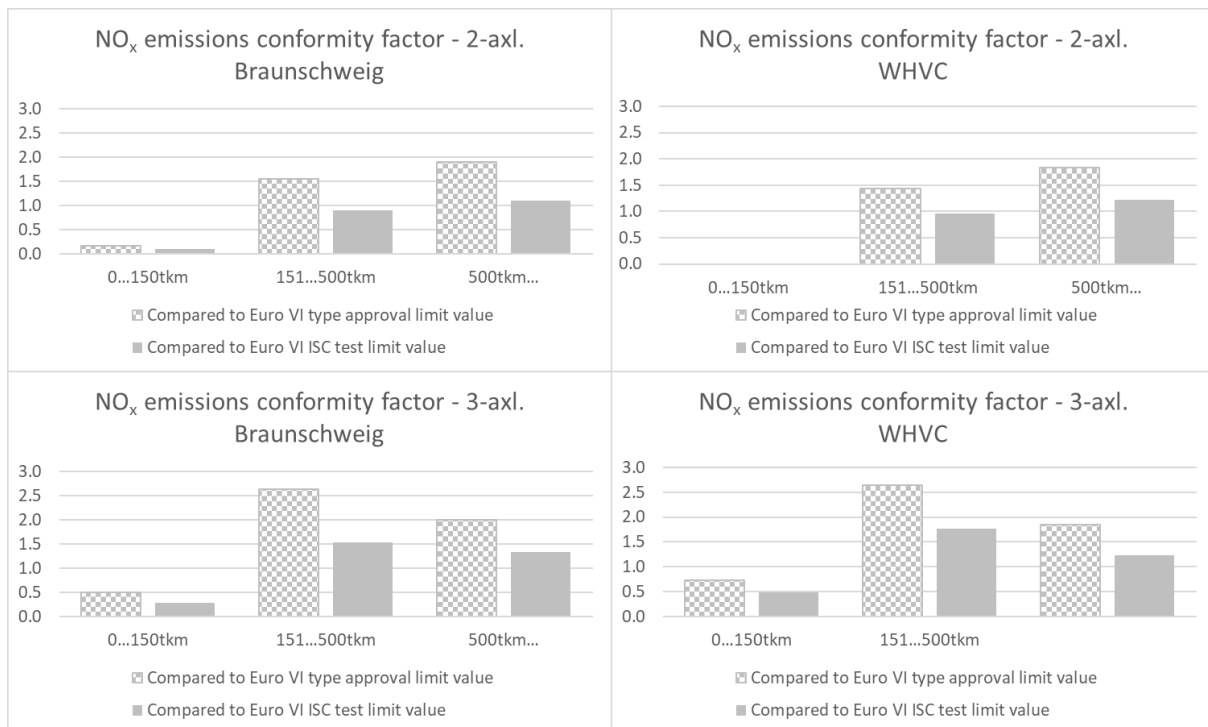
Muiden päästökomponenttien osalta ei vastaavanlaista päästötasojen kasvua ole havaittavissa. Itse asiassa hiukkasmassapäästöjen (PM) osalta keskimääräiset päästötasot jopa hie-
man laskevat ajokilometrien kasvaessa.

Energiankulutuksen osalta selkeää trendiä ei ole havaittavissa. Molemmilla sekä 2- että 3-akselisten bussien osalta Braunschweig- ja WHVC-syklillä keskimääräinen energiankulutus pysyy melko vakiona ajokilometrien kasvaessa. Tämän voi hyvin nähdä myös CO₂-päästötuloksista Kuva 5:stä. CO₂-päästöjen vaihtelu on liki vakiota ajokilometrien kasvaessa. 2-akselisten dieselbussien osalta CO₂-päästöt vaihtelevat 1000 ja 1200 g/km välillä yksilöstä riippuen. Vastaavasti 3-akselisten dieselbussien osalta CO₂-päästöt vaihtelevat välillä 1300 - 1500 g/km

yksilöstä riippuen. Vastaava vaihtelu on nähtävissä myös energiankulutuksen osalta, josta CO₂-päästöt eli polttoaineenkulutus ovat suoraan riippuvaisia.

Kuva 6:ssa on esitetty Braunschweig- ja WHVC-sykleillä mitattujen keskimääräisten NO_x-päästöjen suhde, ns. CF-kerroin⁷, jolla mitattua päästötulosta verrataan raskaan kaluston Euro VI-moottorien lainsäädännön raja-arvoihin sekä tyyppihyväksyntäsyklillä WHTC että ajoneuvolla maantiellä suoritettavan käytönaikaisten päästöjen seurantamittauksella ISC⁸. Vertailu ei ole absoluuttisen tarkka, sillä tyyppihyväksymistestit tehdään pelkällä moottorilla, kun taas alustadynamometrimittauksen tulokset on laskettu moottorin kampiakselille olettamalla voimansiirron hyötysuhteeksi 75 %⁹, eli luku, joka perustuu mittauksilla arvioituun voimansiirron hyötysuhteeseen WHVC- ja Braunschweig-sykleillä.

Esitetyssä vertailussa on syytä kuitenkin huomata, että WHTC-sykli poikkeaa kuormitusprofiiltaan Braunschweig-syklistä ja WHVC-syklistä, vaikka WHTC on johdettu nimenomaan WHVC-syklin nopeusprofiilista. Käytönaikaisten päästöjen mittausta ISC suoritetaan normaalin liikenteen joukossa. Kaupunkibussien osalta syklin tulee sisältää n. 70 %:a kaupunkiajoa ja n. 30 %:a maantieajoa. ISC-reitillä sallitaan 1,5 kertaiset päästöt suhteessa WHTC-sykliin. Kuva 6:n vertailu antaa kuitenkin hyvän arvion päästöjen kehityksestä ajokilometrien kasvaessa suhteessa lainsäädännön raja-arvoihin.



Kuva 6: NO_x päästöt suhteessa lainsäädännön raja-arvoihin.

WHVC-syklillä on mitattu vain yksi alle 150 tkm ajettu 2-akselinen bussi. Tämän takia Kuva 6:ssa ei ole merkitty CF-kerrointa 0...150 tkm ajetuille 2-akselisille busseille WHVC-syklillä.

Kuvasta nähdään hyvin edellä kuvattu keskimääräisen NO_x-päästöjen kohoaminen ajokilometrien myötä, ja sen suhde tyyppihyväksyntä raja-arvoihin. Alle 150 tkm ajetuilla busseilla NO_x-päästöt ovat reilusti alle raja-arvojen (CF-kerroin 0,6 tai alle), kun taas yli 150 tkm ajetuilla

⁷ CF = Conformity factor, vaatimuksen mukaisuus kerroin

⁸ ISC = In-service Conformity, Euro VI raskaiden ajoneuvojen käytönaikaisten päästöjen vaatimusten mukaisuus testi

⁹ Luku 75 % on saatu jakamalla vetävien renkaiden tuottama teho alustadynamometrin rullille moottorin teholla. Luku pitää siten sisällään myös apulaitteiden kuluttaman tehon.

busseilla NO_x-päästöt ovat reilusti yli tyyppihyväksyntä raja-arvon (CF-kerroin luokka 2-akselisilla busseilla 1,5 ja 3-akselisilla 2,5) ja parhaimmillaankin aivan ISC-reitin raja-arvolla (2-akseliset bussit). Yli 500 tkm ajetuilla kahdella 2-akselisella bussilla CF-kerroin nousee noin kaksikertaiseksi Braunschweig- ja WHVC-sykleillä tyyppihyväksyntä raja-arvoon nähden. Vastaa- vasti 3-akselisilla busseilla CF-kerroin on noin 2 yli 500 tkm ajetuilla busseilla sekä Braun- schweig- että WHVC-syklillä.

6. Yhteenveto

Vuoden 2020 Rakebus -projektin myötä VTT:n ylläpitämä kaupunkibussien päästötietokanta kattaa tällä hetkellä yhteensä 204 kaupunkibussia (dieselbusseja Euro I - VI-luokissa, kaasubusseja Euro II - VI-luokissa sekä EEV-luokan etanolibusseja) Braunschweig-syklillä mitattuna (täysin lämmenteillä moottoreilla). Lisäystä vuoteen 2019 nähden on 21 auton mittaustulokset joista neljä on Euro VI -kaupunkibussien kenttäseurantaprojektin (2017-2020) puitteissa alustadynamometrillä vuonna 2020 suoritettuja testejä. Tulokset ovat keskenään täysin vertailukelpoiset samana pysyneen Braunschweig-mittaussyklin ja -menetelmän ansiosta.

Vuoden 2017 aikana otettiin mittauksissa käyttöön myös WHVC-sykli ja yhdistelmä kylmä- ja kuumakäynnisteisestä testauksesta. Näin tuotetaan mittaustuloksia tavalla, joka vastaa Euro VI-moottorien tyyppihyväksymissykliä WHTC, ja mahdollistetaan suuntaa antava vertailu moottorivalmistajan ilmoittamiin hyväksymistuloksiin tai varsinaisiin raja-arvoihin.

Edelleen pääosa tuloksista ilmoitetaan ajoneuvolle muodossa g/km. WHVC-syklin tulokset on ilmoitettu ns. yhdistelmätuloksena, joka on painotettu keskiarvo kylmän ja kuumen syklin tuloksista. Painokertoimet ovat samat kuin tyyppihyväksymisessä käytetyt (kylmäsyklin painokerroin on siis 14 % ja kuumasyklin 86 %). Vuonna 2018 arviointiin otettiin mukaan myös ns. CF-kerroin, eli tuloksia verrattiin suhteessa varsinaisiin raja-arvoihin. Tällöin alustadynamometritulokset muutetaan hyväksymismittauksiin verrannollisiksi moottoritestiarvoiksi ottamalla huomioon voimasiirron ja apulaitteiden arvioidut häviöt. CF-kerroin havainnollistaa selkeästi päästötasoa suhteessa lainsäädännön tavoitteeseen.

Vuonna 2017 päästötietokannan raportoinnissa otettiin käyttöön myös kunkin päästöluokan mittaustulosten jaottelu kolmeen ryhmään bussien ajokilometrien perusteella. Jaottelun johdosta nyt on nähtävissä NO_x-päästöjen kehitys ajokilometrien kasvaessa. Mittausten perusteella näyttäisivät Euro VI -autojen NO_x-päästöt olevan alle 150 tkm ajettuina todella matalalla tasolla, mutta nousevan melko voimakkaasti ajokilometrien kasvaessa. Muiden päästökomponenttien osalta ei vastaavanlaista kehitystä ole havaittu. CF-kertoimet ovat alle 150 tkm ajetuille autoille enimmillään 0,6. Keskiryhmän 150 - 500 tkm autoilla kerroin on selvästi korkeampi, pahimmillaan 2,5-kertainen (3-akseliset) varsinaiseen raja-arvoon ja 1,7-kertainen ns. ISC-arvoon verrattuna. Vuoden 2020 projektin aikana mittauksiin saatiin myös viisi 2-akselista ja kahdeksan 3-akselista bussia joiden ajomäärä oli yli 500 tkm. Niiden tulosten osalta näyttäisivät NO_x-päästöjen hajonta kasvavan merkittävästi bussiyksilöiden välillä.

Tulokset viittaavat selkeästi siihen, että NO_x-päästöt ja ennen kaikki niiden hajonta kasvavat ajokilometrien kasvaessa. Päästötietokannassa on nyt seitsemän 2-akselisen ja kahdeksan yli 500 tkm ajatun Euro VI-bussin tulokset. Euro VI-autojen mittaustulokset ovat kuitenkin vielä suhteellisen vähäiset, jolloin yksittäisten autoyksilöiden vaikutus on vielä kohtuullisen merkittävä. Näiden asioiden johdosta sekä ottaen huomioon havaittu NO_x-päästöjen kasvu ajokilometrien kasvaessa on hyvin perusteltua jatkaa Rakebus-projektin puitteissa suoritettavaa mittaustoimintaa Euro VI-bussien todellisten päästöjen todentamiseksi. Euro VI-lainsäädäntö edellyttää bussien pakokaasujen hallintajärjestelmiltä vähintään 300.000 km:n ja 6 vuoden tai 700.000 km:n ja 7 vuoden kestoikää riippuen ajoneuvokategorian (M₃) luokasta.